

37 高速フェリーの船型最適化

CFD 研究開発センター
高度輸送領域 推進性能研究グループ
海上安全研究領域 耐航・復原性能研究グループ

*平田 信行
日夏 宗彦
辻本 勝

1. まえがき

この十年、計算流体力学 (CFD) の飛躍的な発達に伴い、高い信頼性と精度を有する船体まわりの流れ解析が可能になり、Navier-Stokes(NS) ソルバーは、設計の現場でも「数値水槽」として抵抗・推進性能が優れた船型を選択するための性能評価ツールとして利用されている。さらに最近では、非線型計画法による最適化アルゴリズムと CFD との組合せにより、与えられた条件下で抵抗が最小となる船型を自動探索する形状最適化に関する研究も活発に進められており^{1, 2, 3)}、シミュレーションを援用する新たな設計手法 (SBD) の構築が強く望まれている。

造船設計における SBD システムは、データベース上の統合されたプロダクト・モデルに対して、性能設計、構造設計、製造、運航などをシミュレーションによりコンカレントに評価し、その結果を統合してプロダクト・モデルに反映するプロセスを可能にする⁴⁾。このようなシステムでは、様々なシミュレーション、可視化技術、CAD などが共通のインターフェースを介してシームレスに連結する必要がある。

本研究では、SBD の概念を適用したプロトタイプとして、船型定義 (CAD)、流れ解析 (CFD)、最適化の 3 つのモジュールをシームレスに統合した CAD/CFD ベースの船型設計システムを開発した。最小とすべき目的関数は、実際に船舶が航行する海域の環境条件下における抵抗、つまり、平水中の抵抗と波浪中の抵抗増加の線形和とした。また、制約条件として、船長、排水容積一定、最大上下加速度、船舶復原性規則の遵守を課した。

以下にそのシステムの概要と、高速フェリーに適用した例を示す。

2. CAD/CFD ベースの船型設計システム

今回開発した CAD/CFD ベースの船型設計システムは、図-1 に示すように 3 つのモジュールから構成されている⁵⁾。

2.1 船型定義モジュール (CAD)

船型を定義するには、原船型をベースにする方法とスクラッチから形状を組み立てる方法の 2 通りが考え

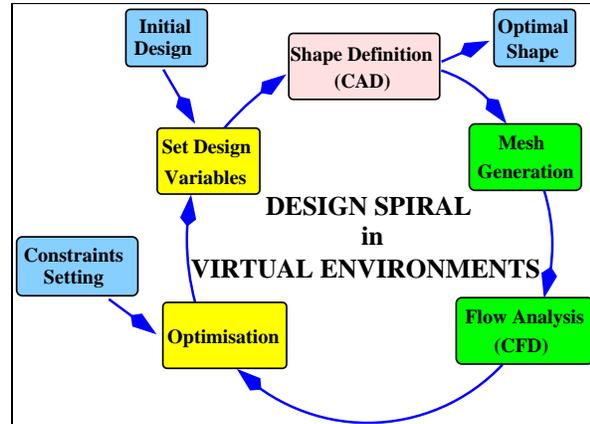


図-1 設計スパイラル

られる。今回は、前者を採用し、原船型 (x_0, y_0, z_0) のプロファイルは固定、幅方向 (y 座標) に Bezier パッチを乗じる重み関数法を用いて船型変形を行った。なお、本パッチは、図-2 に示すように滑らかな関数のため、原船型の滑らかさを保持しながら、自由に船型を変形できる。

次式が、 $m \times n$ 個のコントロールポイントにより定義される Bezier パッチである。

$$\alpha(u, v) = 1 + \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{j=0}^{m+1} J_{n+1,i}(u) K_{m+1,j}(v) P_{i,j}(u, v) \quad (1)$$

$$J_{n+1,i}(u) = {}_{n+1} C_i (1-u)^{n+1-i} u^i \quad (2)$$

$$K_{m+1,j}(v) = {}_{m+1} C_j (1-v)^{m+1-j} v^j$$

ここで、 u, v は船体上の x, z 座標を表す無次元パラメータ、 $P_{i,j}$ はコントロールポイント上での重みであり、本設計スパイラルの設計変数である。なお、本研究では $n = 8, m = 8$ と設定し、設計変数は 64 個とした。

原船型の計算格子の y 座標 $y_0(u, v)$ に直接、重み関数 $\alpha(u, v)$ を乗じることにより、原船型は幅方向のみ変形する。

$$y_1(u, v) = y_0(u, v) \times \alpha(u, v) \quad (3)$$

次に、拘束条件である排水容積一定を満足するために、船型 (x_0, y_1, z_0) と原船型の排水容積 V_1, V_0 から次

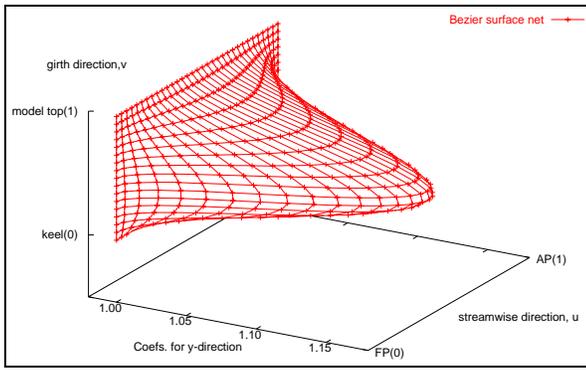


図- 2 船型変更のための Bezier パッチ

式に示すように幅方向に一定の数を乗じ、新しい船型の計算格子 (x_0, y_2, z_0) を定義する。

$$y_2(u, v) = y_1(u, v) \times \frac{V_0}{V_1} \quad (4)$$

2.2 流れ解析モジュール

本研究では、最小とすべき目的関数を、実際に船舶が航行する海域の環境条件下における抵抗とした。これを、平水中の抵抗と波浪中の抵抗増加の 2 つの成分に分け、各々を CFD ツールとストリップ法に基づく抵抗増加計算手法を用いて推定した。ただし、対象は模型船スケールである。

2.2.1 計算格子生成

CFD には前処理として計算格子を生成する必要がある。しかし、計算格子の品質によって計算結果が大きく変わることはよく知られており、特に格子点数が少ない場合にはこの傾向が顕著である。このため、原船型 (初期格子) を参考にして格子を生成する方法を採用し、品質の均一化を図った²⁾。

(4) 式により定義された物体形状から、物体より 1 つ外側の格子点 $X_{k=2}^{mod}$ を物体表面の直交ベクトルと初期格子の格子間隔を用いて決定する。次に、物体より 2 つ外側の格子点 ($k=3$) から外部境界 ($k=k_{max}$) までの計算格子を次式に従って生成する (図-3 参照)。

$$X_k^{mod} = X_k^{orig} + w_k(X_{k=2}^{mod} - X_{k=2}^{orig}) \quad (5)$$

なお、 w_k は次式に示すように、原船型の格子線上の外部境界からの長さを、外部境界で 0、 $k=2$ で 1 になるように無次元化した重み関数である。

$$w_k = \frac{\sum_{k=k_{max}}^{k+1} \|X_k^{orig} - X_{k-1}^{orig}\|}{\sum_{k=k_{max}}^3 \|X_k^{orig} - X_{k-1}^{orig}\|} \quad (6)$$

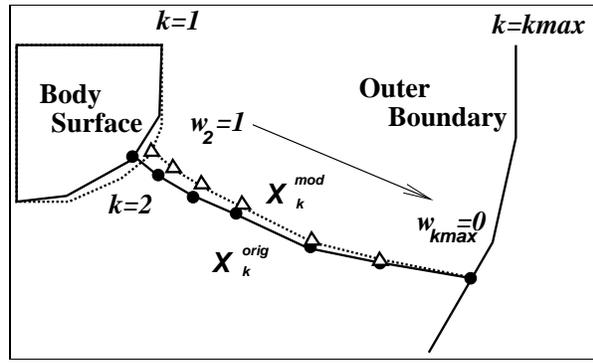


図- 3 初期格子に基づいた格子生成

2.2.2 NS 計算

最適化計算において、目的関数は数十回から数百回と大量に計算する必要がある。このため、現実的な時間で設計スパイラルを終了させるには、非常に高速な NS ソルバーを用いることが必須である。本研究では、平水中の抵抗を推定する CFD ツールとして、当所で開発した高効率 NS ソルバー NEPTUNE コード⁶⁾ を用いた。本ソルバーの特徴は以下に示すとおりである。

- 支配方程式は、疑似圧縮性を考慮した NS 方程式。
- 空間離散化はセル中心の有限体積法。
- 非粘性項は、Roe スキーム+MUSCL で評価。
- 粘性項は、2 次の中心差分で評価。
- 時間離散化は 1 次の陰的差分。
- NS 方程式の解法は、準 Newton 法+sGS 法。
- 自由表面は、表面追跡による適合格子法。
- 乱流モデルは BL モデル。
- 高速化のために、マルチグリッド法を適用。
- 計算格子は構造格子対応。

2.2.3 抵抗増加計算

抵抗増加量は、設定海象の条件下において、規則波中の抵抗増加応答関数を用いて推定した。このときの波スペクトルは修正 Pierson-Moskowitz モデル、方向分布は光易の cos 自乗型を用いている。規則波中の抵抗増加計算は、船体運動を STF 法によるストリップ法で計算した結果を用いて、丸尾の式で計算した。なお、短波長域に対しては Faltinsen の方法を用いている。

2.3 最適化モジュール

CFD を用いた船型最適化システムでは、流れ場は非線型の NS 方程式に支配されているため、目的関数は設計変数の非線型関数である。したがって、非線型最適化問題として取り扱う必要があり、大域的な最適解

表- 1 MS635(原船型) の主要目および設計速度

	Model	Ship
L_{pp} (m)	6.6560	187.00
L_{WL} (m)	6.8695	193.00
B (m)	0.9966	28.00
d (m)	0.2492	7.00
C_B	0.4815	
V_s (kn)	31.9	

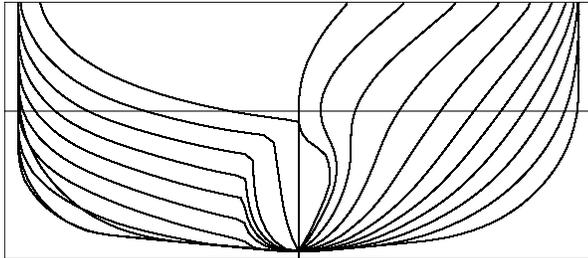


図- 4 原船型の正面線図

を得る可能性の高い遺伝的アルゴリズム (GA) を用いることとした。本研究では、GA のなかでも、再初期化を繰り返すことにより、小さい集団数で速い収束解を得ることが可能な micro-GA⁷⁾ を適用した。集団数は 39 とし、変数はバイナリ表現で変換した。なお、GA オペレータとして、トーナメント戦略、一様交叉 (0.5)、突然変異 (0.02) を用いた。また、制約条件である運航限界 (上下加速度が原型船以下) と船舶復原性規則 (沿海区域以上の旅客船の復原性) は、penalty 関数として目的関数に付加した。

3. 適用例

本システムを用いて、裸穀状態の高速カーフェリー MS635(原船型) に対して、実海域における模型船スケールの抵抗が最小となるように形状最適化問題を解いた。原船型の主要目および設計速度、正面線図を表-1、図-4 に示す。計算条件である L_{pp} ベースのレイノルズ数、フルード数はそれぞれ 1.6×10^7 、0.3833 とした。また、設定海象は、有義波高 4m、平均波周期 8.5 秒、波向きは向波である。

3.1 NS ソルバーの精度確認

最適化を行う前に、流れ解析モジュールの平水中抵抗推定の精度を検証するため、原船型に対して水槽試験結果との比較を行った。

原船型には大きなトランサムスターンがついているため、船尾端より後方に船長の 5% をかけて船尾を丸めた。用いた計算格子のトポロジーは H-O で、格子点数は、主流方向に 65 点、ガース方向に 25 点、境界層方

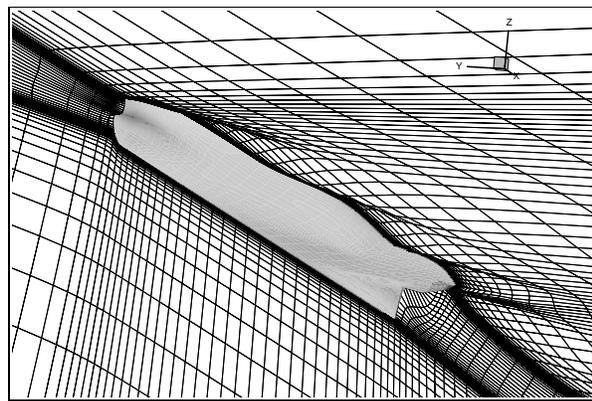


図- 5 原船型まわりの計算格子

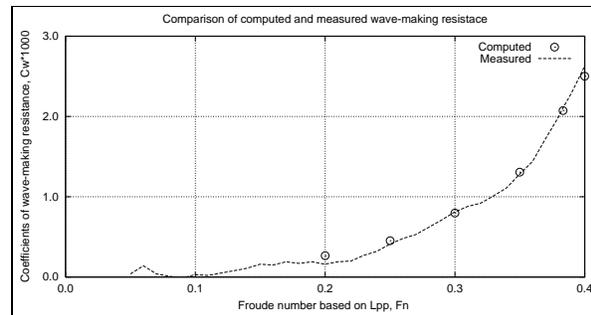


図- 6 造波抵抗係数の比較

向に 41 点の計 66,625 点とした。また、最小格子間隔は 2×10^{-6} である。図-5 にフルード数 0.3833 で計算した時の収束解の格子を示す。

形状影響係数 $1+K$ は、計算格子が粗いこともあり、水槽試験の 1.10 に対し計算は 1.18 と少し大きめに評価されている (50 万程度の計算格子では 1.16)。一方、造波抵抗は図-6 に示すように実験と良く一致しており、本推定ツールは適用可能であると考えられる。

3.2 抵抗の最小化

抵抗最小化の履歴を図-7 に示す。縦軸は原船型との割合である。10 世代で得た最適解は、平水中の全抵抗 C_t が約 6%、波浪中の抵抗増加が約 10%、合計抵抗も約 6% の低減を達成している。また、主要な平水中抵抗のうち、摩擦抵抗 C_f は浸水面積 S_w の 2% 減に伴い同程度減少し、圧力抵抗に関しては 10% 以上減少している。

図-8,9 には、原船型と最適船型の正面線図と水線面形状の比較を示す。全幅は 7% 程度小さくなっており、また船体後半部を細くするために重心が船体前半部に移っていることがわかる。このため、船首部の水線面形状が原船型よりわずかに太くなり、図-10 に示すように船首波も多少大きくなっているが、逆に船尾波は小さくなるなど圧力抵抗の低減に寄与している。

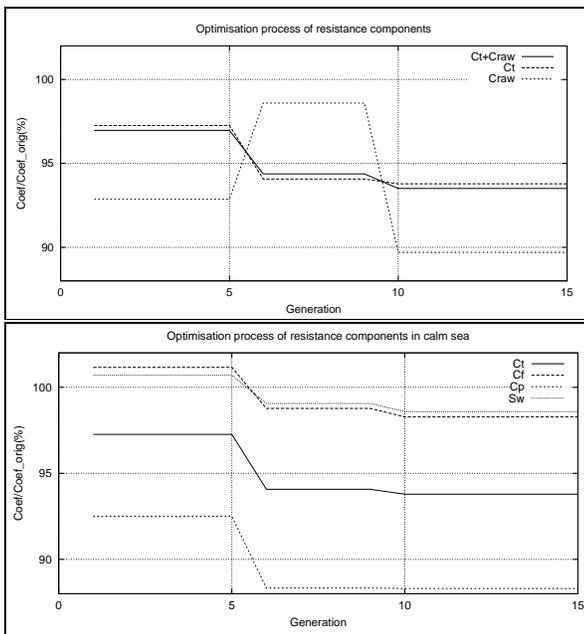


図-7 最適化プロセス

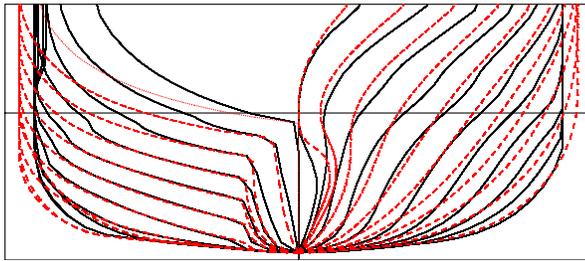


図-8 原船型と最適船型の正面線図の比較 (点線は原船型)

4. 結論

SBD の概念を適用したプロトタイプとして、船型定義 (CAD)、流れ解析 (CFD)、最適化の3つのモジュールをシームレスに統合した CAD/CFD ベースの船型設計システムを開発した。本システムを用いて、高速カーフェリーに対して、実海域における模型船スケールの抵抗が最小となるように形状最適化問題を解き、約6%の抵抗低減を達成した。今後は、より一層の CFD 精度の向上、自由度の高い船型定義手法の開発とともに、配置計画や構造計画などのシミュレーションツールとのリンク等を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Tahara, Y. and Himeno, Y.: An Application of Computational Fluid Dynamics to Tanker Hull Form Optimization Problem, *Proc. of the Third Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design* (1998).

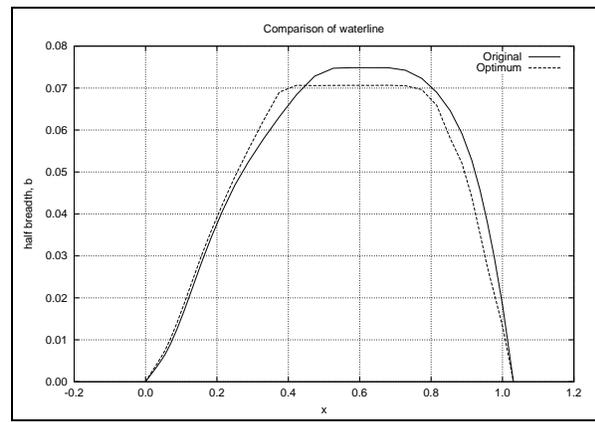


図-9 原船型と最適船型の水面線形状の比較

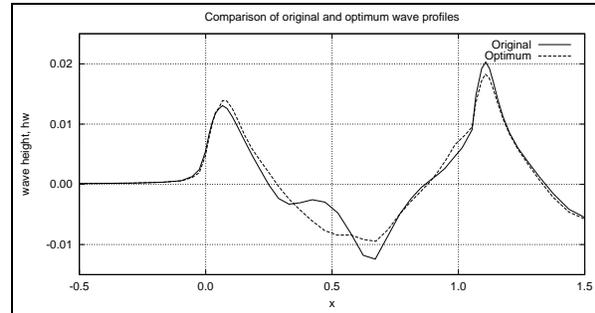


図-10 原船型と最適船型の船側波形の比較

- 2) Hino, T.: Shape Optimization of Practical Ship Hull Forms Using Navier-Stokes Analysis, *Proc. of 7th Intern. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics* (1999).
- 3) Hirata, N.: Comparison of Genetic Algorithm and Gradient-Based Method Applied to Ship Shape Optimization, *JKSNAJ*, no.241 (2004).
- 4) Boudreaux, J.S., "Naval Ships and Simulation Based Design", *SNAME Trans. vol.103* (1995).
- 5) Hino, T. and Hirata, N.: A CAD/CFD Integration System for Ship Hull Form Design, *Proc. of 1st World Maritime Conf. of Marine Tech., SNAME* (2003).
- 6) Hirata, N. and Hino, N.: An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Ship, *JSNAP*, vol.185 (1999).
- 7) Coello, C.A. and Pulido, G.T.: A Micro-Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization, *1st Intern. Conf. on Evolutionary Multi-Criterion Optimization* (2001).